

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 911.2:550.837.2

В.В. Сысуев¹

ГЕОРАДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИМАСШТАБНЫХ СТРУКТУР В ЛАНДШАФТАХ НА ПРИМЕРЕ СМОЛЕНСКО-МОСКОВСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Методами подповерхностной георадиолокации (GPR) проведено зондирование структур почв и отложений Валдайского возвышенности в ландшафтах краевой зоны последнего оледенения и вторично-моренных ландшафтов Смоленско-Московской возвышенности. Использование георадара «ОКО-2» с антенными блоками и с разными рабочими частотами (35—100, 700 и 250 МГц) позволило исследовать полимасштабные трехмерные структуры почв и отложений, гидрогеологическую структуру водосборного бассейна малой р. Лонинка.

Ключевые слова: полимасштабные структуры, ландшафты, подповерхностная георадиолокация.

Введение. Перспективность геоэлектроманнитных методов исследования строения и свойств приповерхностной части отложений и почв демонстрировалась неоднократно [2—4, 13, 14]. Преимущество геоэлектроманнитных методов заключается в том, что путем модификации датчиков и их положения относительно измеряемых полей можно одним и тем же прибором измерять аномалии от разномасштабных природных объектов. Так, методы электроразведки результативны при зондировании геологических структур, расположенных на глубине несколько десятков, сотен и даже тысяч метров. Тем не менее выбор расстояния между измерительными электродами в 2—3 раза меньше, чем горизонтальная протяженность исследуемых структур, и малый шаг измерений позволяют исследовать методом электрического профилирования (ЭП) существенно меньшие подповерхностные структуры. Например, методом ЭП выполнена площадная съемка погребенного мерзлотного реликтового полигонально-блочного микрорельефа [3]. Возможность применения метода обоснована различием электросопротивления суглинков, которые однородны по составу и удельному электрическому сопротивлению ($\rho = 35 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) и заполняют трещины-жилы опесчаненных отложений ($\rho = 55 \div 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Таким образом, задача выявления и картирования грунтовых псевдоморфоз по повторно-жильным льдам сводилась к установлению плохопроводящих линейно вытянутых (в пределах одной стороны полигона) тел, имеющих клинообразное сечение в вертикальном разрезе и находящихся в верхах геоэлектрического разреза на глубине 2—3 м.

Для выяснения вертикального и горизонтального строения пород и почв в зоне аэрации, а также на-

почвенных покровов (снег, лед, растительность и т.п.) наиболее перспективно применение методов высокочастотного электромагнитного зондирования — радиокип, сверхвысокочастотной радиометрии (СВЧ РМ) и радиолокации. Методы СВЧ РМ используются для дистанционного площадного измерения толщины льда, запасов влаги в снеге и атмосфере, плотности и объемной влажности почв, температуры, интенсивности волнения моря с самолетов. Можно применять СВЧ РМ и для измерения уровня грунтовых вод (УГВ) неглубокого залегания (до 1,0—1,5 м), степени минерализации и контроля за загрязнением пресных открытых водоемов, а также объемов биомассы [2].

В настоящее время очень активно развиваются и применяются методы радиолокационного подповерхностного зондирования (ground penetrating radar, GPR). Наиболее ярко видны возможности этих методов на примере недавних фундаментальных открытий подледникового рельефа Антарктиды и особенно Гренландии. Методами авиационных подледных радарных исследований (ice penetrating radar, IPR) под ледниковым щитом на севере Гренландии обнаружен каньон длиной более 750 км и глубиной до 800 м [13]. В этой работе на основе физико-математического моделирования динамики ледника представлены убедительные доказательства формирования каньона несколько миллионов лет назад, т.е. до оледенения, и влияния каньона на поток подледных вод из внутренних частей ледникового щита к его границам за последние ледниковые циклы и в настоящее время.

Несмотря на очевидные преимущества зондирования приповерхностных отложений (высокая производительность, пространственная непрерывность,

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: v.v.syss@mail.ru

возможность иерархического исследования, получение пространственного распределения физических свойств объектов и др.), GPR применяется в ландшафтоведении и почвоведении ограниченно. Например, из более чем 1000 публикаций, появившихся за последние 10—15 лет в научной литературе, рассматриваемой тематике посвящено не больше десяти работ, и то в значительной мере они имеют археологическую направленность [13]. Такое положение обусловлено рядом причин: дорогое и сложное оборудование, нехватка квалифицированных операторов, сложность интерпретации радарограмм без верификации по результатам бурения, недостаточные разрешающая способность и глубина зондирования для конкретных исследований, быстрое затухание сигналов в суглинистых и глинистых отложениях, влияние многочисленных природных и антропогенных помех, необходимость подготовки трасс зондирования и др. Развитие программно-аппаратных средств для устранения этих недостатков также не способствует удешевлению средств GPR.

В связи с этим создано много фирм, проводящих изыскания различной направленности. За рубежом помимо инженерной геолого-геофизической направленности эти фирмы интенсивно поставляют свои услуги сельскохозяйственной, лесохозяйственной и другим отраслям. Методы GPR широко применяются для выявления зон загрязнения и засоления почв и последующего принятия мер по повышению плодородия почв, особенно в районах ведения прецизионного и «зеленого» сельского хозяйства. В лесном хозяйстве и озеленении GPR используют для исследования трехмерной структуры корневых систем древесных и кустарниковых пород. Неразрушающие методы GPR применяют при поиске и картировании всевозможных подземных коммуникаций и трубопроводов, мониторинге качества насыпей железнодорожных и автотранспортных магистралей, картировании кладбищ и свалок бытовых отходов, создании и ремонте дренажных сетей полей для гольфа. Подробный обзор использования GPR не входит в цели статьи — это отдельная задача в связи с разнообразием работ и программно-аппаратных средств.

Постановка проблемы. Объективное выделение полимасштабных структур и границ между ними — одна из центральных проблем в ландшафтоведении, в ландшафтной экологии. Полевые методы и методы формализованного выделения и идентификации структуры природно-территориальных комплексов (ПТК) на основе анализа цифровых моделей местности и спектрозональных данных дистанционного зондирования (ДДЗ) развиваются довольно активно [8], в то же время работ, посвященных методам физического определения подповерхностных границ природных объектов различного ранга, очень мало.

Поскольку литолого-гидрогеологическое строение — важнейший фактор дифференциации ландшаф-

тов, использование GPR может стать весьма перспективным для выявления границ структур разного порядка, исследования физических свойств и процессов в геосистемах. Это обусловлено не только оперативностью результатов, но и возможностью получить трехмерную пространственно непрерывную структуру среды и некоторые физические параметры зондируемых слоев, что крайне важно для корректного применения методов моделирования динамических процессов. В связи с этим задачу работы составляло определение возможностей современного серийного GPR отечественного производства для выявления пространственных полимасштабных (иерархических) структур в почвах и приповерхностных отложениях для решения ландшафтно-экологических задач в различных природных условиях.

Материалы и методы исследований. Метод георадиолокационного подповерхностного зондирования основан на изучении распространения электромагнитных волн в среде. Излучаемые импульсы электромагнитных волн отражаются от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих разную диэлектрическую проницаемость, и регистрируются. Границы раздела в исследуемых средах представлены контактами между сухими и влагонасыщенными грунтами (уровень грунтовых вод), контактами между породами разного литологического состава, между породой и материалом искусственного сооружения, между мерзлыми и тальми грунтами, между коренными и рыхлыми породами и др. [4]. Достоверность обнаружения границ в первую очередь зависит от контрастности величины диэлектрической постоянной ϵ , которая изменяется, например, от 3—6 в сухих песчаных почвах до 10—30 в водонасыщенных песках, 50—70 в торфах и до 81 в пресной воде. Получение интерпретируемой радарограммы очень сильно зависит от затухания сигнала, которое происходит резко при увеличении дисперсности (чем тяжелее гранулометрический состав, тем быстрее затухает сигнал с глубиной) и влажности отложений. Таким образом, самое быстрое затухание наблюдается во влажных тяжелосуглинистых и глинистых почвах и отложениях — до 100 дБ/м, что на 2—3 порядка выше, чем в водонасыщенных песках или торфах [4]. Поэтому применение GPR в ландшафтах на подобных отложениях достаточно проблематично.

Современный георадар — цифровой портативный геофизический прибор для мониторинга подповерхностной среды, сконструированный для работы в труднодоступных районах в широком диапазоне температуры (от -20 до $+40$ °C). Во время зондирования оператор в реальном времени получает информацию на дисплее в виде радиолокационного профиля (радарограммы). Одновременно данные записываются на жесткий диск компьютера для дальнейшего использования. Набор сменных антенных модулей обеспечивает возможность зондирования в диапазоне час-

тот 16—2000 МГц. Увеличение частоты зондирования приводит к улучшению разрешающей способности, но при этом увеличивается затухание электромагнитной волны в среде, что приводит к уменьшению глубины зондирования; и наоборот, снижением частоты можно добиться увеличения глубины зондирования, но при этом ухудшается разрешающая способность. Кроме того, со снижением частоты увеличивается зона начальной нечувствительности (так называемая мертвая зона) георадара.

Исследования почв и отложений Валдайской возвышенности и вторично-моренных ландшафтов Смоленско-Московской возвышенности с помощью георадара «ОКО-2» (ООО «ЛОГИС», г. Раменское, Московская обл.) проводилось в полевые периоды 2009—2011 гг. Использованы антенные блоки (АБ) «Тритон» с рабочими частотами 35—100 МГц для зондирования глубоких слоев отложений и АБ двухчастотного излучения 250 и 700 МГц для почвенных горизонтов и почвообразующих пород.

Зондирование в краевой зоне валдайского оледенения на территории Национального парка Валдайский осуществлялось с АБ «Тритон» вдоль ландшафтных трансект с привязкой к абсолютной высоте и данным ленточной лесотаксации. Подробное описание физико-географических условий и структуры ландшафтов приведено в работах [1, 12]. Предварительно в каждом ландшафте экспериментально на небольших ключевых участках выявляли оптимальные режимы зондирования.

Зондирование вторично-моренных ландшафтов Смоленско-Московской возвышенности проведено на хорошо исследованной территории Учебно-научной станции географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова «Сатино» [6].

Обработку полученных радарограмм (устранение помех и усиление сигналов, выделение слоев и определение диэлектрической проницаемости ϵ , раскраска по величине и частоте сигнала, привязка к рельефу и построение 3D-изображений и др.) выполняли с использованием стандартного математического обеспечения ООО «ЛОГИС» GeoScan32, версия 2.5.

Результаты исследований и их обсуждение. *Определение литолого-гидрогеологических границ урочищ и фаций в краевой зоне Валдайского оледенения.* Зондирование *конечно-моренных гряд*, основную толщу которых составляют влажные валунные суглинки и глины, показало, что волны этого диапазона АБ «Тритон», имеют низкую проницаемость. Убедительно разделить моренные отложения не получилось при всех опробованных режимах съемки. Однако сканирование вдоль трансект дает очень хорошее воспроизведение термокарстового рельефа и структуры ландшафтов, скрытых в результате торфонакопления в термокарстовых воронках и озерах. Отчетливо дешифрируются также супесчаные отложения на поверхности морены и их мощность. *Покровные супеси*, широко

распространенные в области валдайского оледенения, существенно влияют на процессы почвообразования, состав и продуктивность древостоев [11]. Методы подповерхностного зондирования, по-видимому, могут способствовать установлению происхождения этих отложений.

Хорошие результаты получены при зондировании *грядово-котловинно-озового*, *камово-западного* и *озерно-флювиогляциально-зандрового* ландшафтов.

На радарограмме *крутосклонной озовой гряды* выделяется песчано-каменистое тело, направление и простираемость слоев, уровень грунтовых вод (УГВ). На вершине гряды УГВ превышает 6 м, здесь формируется елово-сосновый лес с максимальными высотой и запасами древостоя; на склонах, где УГВ подходит к поверхности, ель начинает преобладать над сосной, появляется ольха, запасы древостоя уменьшаются.

На *камовом холме* на радарограмме отчетливо видны мощность и структура отложений слабосортированных песков (рис. 1). Зондированием определен и верифицирован по данным бурения уровень грунтовых вод, выявлены глубина и границы камового образования, определена длина его простираемости в пределах болотного массива, обнаружены слоистые песчаные отложения под долиной р. Лонинка. Отчетливо выявляется тесная связь между УГВ и продуктивностью древостоя. При глубине залегания грунтовых вод > 8 м формируются сосняки лишайниковые и брусничные с запасами древостоя 180—220 м³/га. На склонах грунтовые воды выклиниваются к поверхности, что хорошо видно на радарограмме. Запасы древостоя при оптимальном УГВ (3—5 м) на склонах достигают 350—400 м³/га. В нижних переувлажненных частях склонов появляются ельники с запасом древостоя 80—120 м³/га. При переходе в болото формируются сфагново-багульниковые редкостойные сосняки с запасами < 100 м³/га. Все ландшафтные границы отмечаются по контрастной смене типа, состава отложений и глубине УГВ, выявляющихся на радарограмме в режиме реального времени.

При выставлении параметров максимальной глубины зондирования определена глубина залегания коренных пород каменноугольного возраста на глубине 33—35 м.

Хорошая информативность радарограмм болотных и озерных отложений известна из предыдущих работ [4, 11]. В наших исследованиях *верхового болота* Обловское с центрально-олиготрофным типом развития на радарограммах для всего массива болота отчетливо выделяются 2 горизонта торфа — верхний слаборазложившийся верховой сфагновый торф мощностью 2—2,5 м и нижний сильноразложившийся торф. Также прослеживается сапропелевый горизонт, подстилающий торф в наиболее глубоких котловинах. Выявлен сложный грядовый рельеф минерального дна под торфом; гряда в центре массива

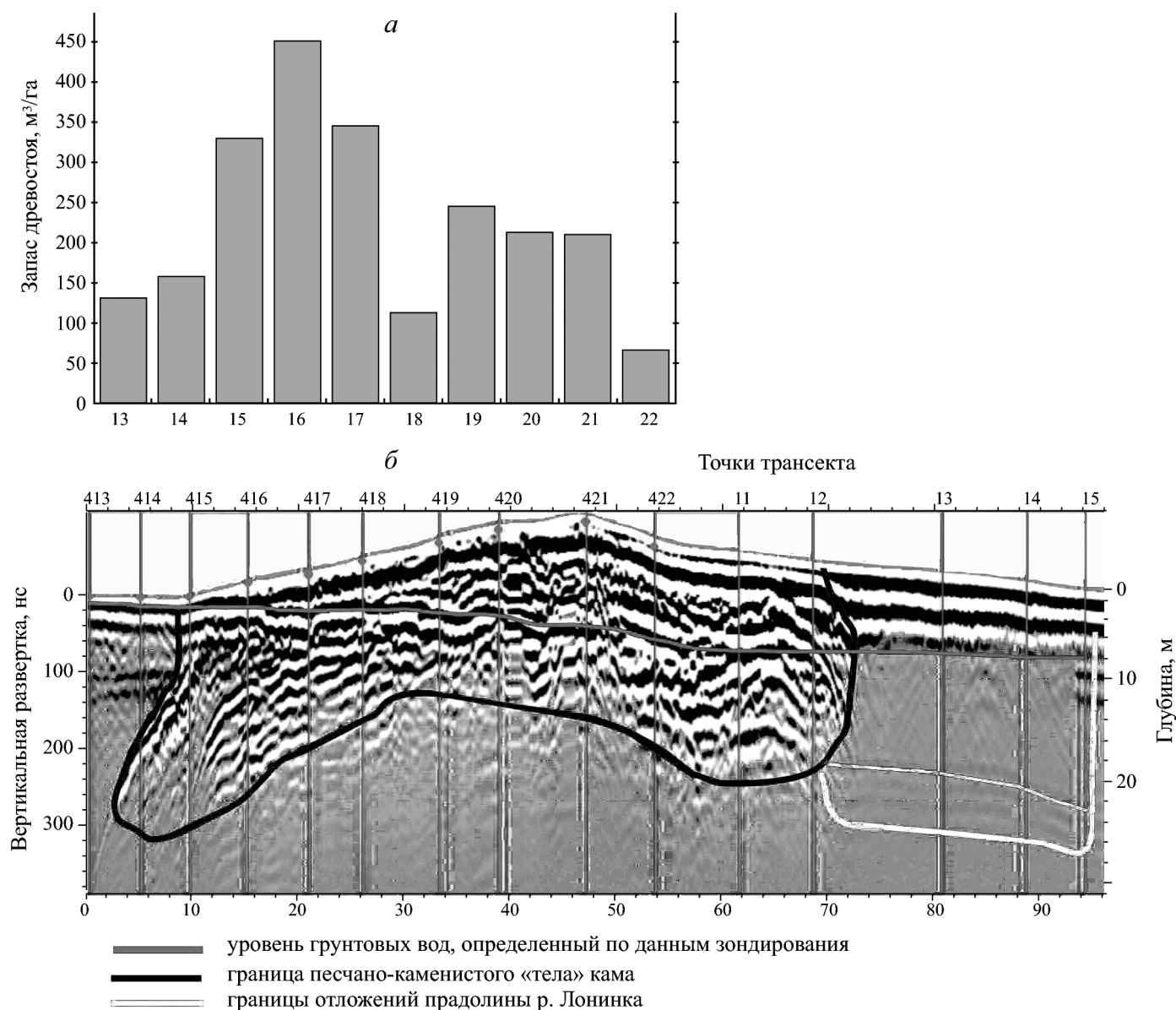


Рис. 1. Связь продуктивности древостоя со структурой отложений камового холма: *а* — запас, м³/га, *б* — фрагмент радарограммы

представляет собой продолжение озовой гряды. Двум понижениям минерального дна торфяной ванны с глубиной залегания торфа > 6 м соответствуют выпуклые автономные части болота с олиготрофной растительностью — фации сосняков пушицево-клюквенно-сфагновых с подбелом и росянкой, а также угнетенным древостоем высотой 4–6 м и запасом 40–60 м³/га. Между наиболее глубокими частями болота на торфах мощностью < 3 м формируются фации сосняков пушицево-сфагновых с миртом и кустарничками. Запас древостоя 60–80 м³/га, высота деревьев 6–10 м. На окраинах болота формируются фации сосняков кустарничково-сфагновых с тростником и сосняков голубично-сфагновых с багульником и черникой на хорошо разложившихся маломощных торфах (< 2 м). Древостой достигает высоты 10–15 м, запасы 100–200 м³/га. Таким образом, установлено, что фациальная структура болотного

ландшафта, развивающаяся с некоторых стадий автономно, изначально связана с рельефом днища.

На радарограмме небольшого *переходного болота* хорошо разделились торфяная ванна и минеральное дно болота, сложенное оглеенными озерными песками. Глубина залегания торфяных слоев практически совпала с буровыми данными и описанием в разрезе. Редкостойные сосны не влияют на качество радарограмм. В пределах болота границы фаций совпадают с границами резкого изменения мощности торфа. В краевых частях болота с небольшой мощностью торфа формируются осоково-пушицевые сообщества с сабельником, сосновый древостой здесь более высокий (15–18 м) и продуктивный (запасы 170–210 м³/га). В центре массива с максимальной мощностью торфа (> 3 м) преобладают фации со сфагново-пушицевой растительностью и редкостойным низкостелетным сосняком (100 м³/га).

Выявление гидрогеологических условий формирования стока на водосборе бассейна малой р. Лонинка методами радиолокационного зондирования выполнено в двух створах. Часть радарограммы отложений долины речки и камового холма, приведенная на рис. 1, характеризует участок долины среднего течения речки.

Подповерхностным зондированием в верхней части водосбора выявлено, что торфяная толща в долине р. Лонинка маломощная (0,5–1,5 м), под торфом залегают водонасыщенные пески мощностью до 3 м. Под песками определяются плотные моренные суглинки с сильным затуханием сигнала.

На вершине гряды, сложенной песчаными и песчано-гравийными отложениями, при помощи специального инструмента программы GeoScan 32 «гипербола» получено истинное значение коэффициента диэлектрической проницаемости ϵ , которое составляет 4,5. Это позволило с большей точностью определить уровень грунтовых вод, осуществляющих питание долины. Так, на вершинах и склонах окружающих озовых гряд УГВ уверенно определен на глубине 9–12 м. В нижней части склона, на террасе и в долине речки грунтовые воды выклиниваются в поверхностных горизонтах почв.

Полученная информация показывает, что гидрологический режим р. Лонинка обусловлен плоской долиной с одной террасой, залеганием на ровных выположенных водонасыщенных зандровых песках мощностью до 3–5 м, перекрытых сверху незначительной толщей торфа мощностью до 1,5 м в верхней части долины. В средней части долины мощность зандровых водонасыщенных песков значительно уве-

личивается, слой торфа уменьшается, а его поверхность становится сильноочковатой. Такие ландшафтные особенности, характеризующиеся большой водоемкостью торфяных отложений, малым уклоном долины, питанием атмосферными осадками и грунтовыми водами с близлежащих озовых гряд, обуславливают зарегулированность стока р. Лонинка. В результате речка с очень маленькой площадью водосбора (в истоке < 1 км²) имеет выраженное русло, постоянный сток и не пересыхает в самые сухие периоды.

Эти данные представляют исключительное значение для математического моделирования гидрологических процессов и использованы нами для расчета интенсивности стока на водосборе, скорости потока в русле и зонирования территории водосбора по величине времени добегания воды в русло р. Лонинка [9].

Определение структуры почв и отложений вторично-моренных ландшафтов Смоленско-Московской возвышенности проведено на хорошо изученной территории УНС «Сатино» [6]. Для выявления трехмерных структур в почвах и приповерхностных отложениях использованы возможности площадного георадарного зондирования на двух частотах излучения — 700 и 250 МГц. Покровные суглинки, перекрывающие моренные и флювиогляциальные отложения, сильно гасят радиосигналы зондирования, что привело к неудаче в экспериментах с АБ «Тритон». Однако чрезвычайно сухой и жаркий летний период 2010 г. способствовал увеличению глубины и разрешающей способности георадарной съемки, что позволило получить содержательные результаты (рис. 2).

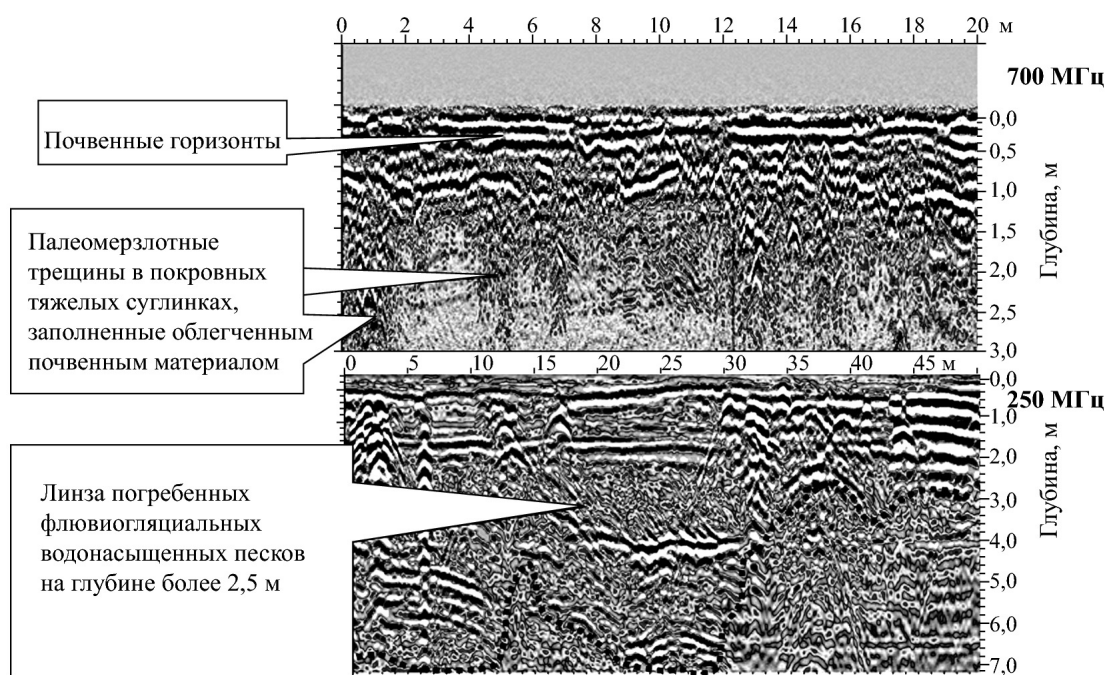


Рис. 2. Фрагменты радарограмм, полученных с помощью АБ 700 + 250 МГц: сверху — фрагмент радарограммы 700 МГц, отображающей мезоструктуру почв на склоне; внизу — фрагмент радарограммы 250 МГц, отображающей более крупные структуры четвертичных отложений в нижней части склона Сенокосной балки

На радарограммах, полученных при частоте 700 МГц с разрешающей способностью по вертикали 0,05–0,1 м, отчетливо дешифрируются следующие трехмерные структуры в почвах: пахотный горизонт по глубине плужной подошвы 20–25 см; границы легкосуглинистых горизонтов с тяжелосуглинистыми горизонтами в покровных суглинках на глубине 50–60 см. Характерные элементы — вертикальные структуры почв, ширина которых в верхней части достигает >1 м, они прослеживаются до глубины 2,5 м (рис. 2). Подобные вертикальные трещинные сети с внутритрещинной массой (ВТМ) и межтрещинной массой (МТМ), представляющие собой особые мезоморфологические элементы почвенного тела, в работе [10] названы вертонами — это переход от описания структуры в почвенном профиле к описанию структуры почвенного покрова, к почве как трехмерному структурному образованию ландшафтного (геосистемного) уровня. Вертоны в текстурированных почвах имеют морфологические особенности (облегченный гранулометрический состав, натечные пленки, концентрация корневых систем и др.), а также специфический гидрофизический режим, формирующий зоны преимущественных потоков влаги. Визуализация вертикальных структур на радарограмме (рис. 2) может быть обусловлена именно наличием натечных пленок, имеющих другой минералогический и гранулометрический состав, влажность, что обеспечивает их выделение по значениям ϵ от остального тела почвы. Зоны преимущественных потоков влаги часто не имеют морфологической специфики, как,

например, в почвах облегченного гранулометрического состава. Тем не менее в некоторых работах показана перспективность методов GPR для обнаружения и контроля преимущественных потоков влаги в почвах, особенно в прецизионном сельском хозяйстве и при мониторинге водоемов-отстойников [14].

Радарограммы, полученные при частоте 250 МГц, имеют разрешающую способность 0,25–0,30 м. В нижней части восточного склона Сенокосной балки на фрагменте радарограммы выделяется линза водонасыщенных песчаных отложений, которые с глубины 2,5–3 м прослеживаются под покровными и делювиальными суглинками до глубины >7 м. Эти отложения характеризуются волнистой и косой слоистостью и несогласным залеганием, что свидетельствует в пользу их флювиогляциального происхождения. Ранее эти отложения, вскрытые системой профилей буровых скважин, описаны как флювиогляциальные пески, выполняющие ложбину стока талых ледниковых вод на стадии деградации московского ледникового щита [5, 6].

Площадная съемка проводилась галсами длиной 200 м вдоль размеченного склона Сенокосной балки. Ширина между галсами 2 м, ширина полигона 20 м. Одновременно выполнена GPS-съемка вдоль галсов. Использование АБ 250 + 700 МГц позволяет существенно увеличить детальность и корректность получения информации. Наличие GPS-датчиков позволяет привязать данные георадарной съемки к картографическим или дистанционным изображениям соответствующего масштаба в геоинформационной систе-



Рис. 3. Привязка границ линзы водонасыщенных лимногляциальных отложений, обнаруженных георадарной съемкой под покровными суглинками на склоне Сенокосной балки. Приведен горизонтальный срез площадной съемки на глубине 2,5 м (использован снимок Google Earth)

ме (ГИС). Вся съемка вместе с подготовкой оборудования и разметкой галсов заняла 4 ч. В результате простыми операциями выполнены трехмерная съемка и привязка границ линзы лимногляциальных отложений легкого механического состава, обнаруженной на глубине > 2 м под покровными и делювиальными тяжелыми суглинками (рис. 3). Таким образом, достоверно выявлена и инструментально подтверждена подповерхностная литологическая граница урочища ложбины стока ледниковых вод в ландшафте вторичной моренной равнины [6].

Выводы:

- метод георадиолокации еще раз убедительно показывает, что литогенная основа (структура, состав и мощность отложений, уровень грунтовых вод) играет ведущую роль в дифференциации структурных единиц ландшафта и типов условий местопрорастания;
- пространственная непрерывность, возможность изменять параметры зондирования позволяют оперативно исследовать трехмерную структуру отложений и почв, гидрогеологическую структуру водосборных бассейнов;
- методами GPR установлены мощность перекрывающих супесей на моренных отложениях, форма

и глубина термокарстовых воронок, сложение торфяной толщи и рельефа днища верховых болот, сложение камовых холмов и озовых гряд, структура отложений водосбора малой реки в зоне последнего оледенения, а также мезо- и макроструктурные элементы почв в ландшафте вторично-моренной равнины;

— площадная GPR-съемка с инструментальной точностью выявила погребенную под покровными суглинками линзу флювиогляциальных песков, граница которой является границей урочища ложбины стока ледниковых вод в ландшафте вторично-моренной равнины;

— наилучшие результаты получены при целенаправленной подготовке трасс (прорубка, расчистка, нивелировка, разметка), использовании средств геопривязки (GPS, ГИС, ДДЗ), выборе оптимальных условий, сроков и параметров зондирования, применении антенных блоков с разной частотой излучения.

На разных этапах в работе принимали участие студенты, аспиранты, стажеры и сотрудники кафедры физической географии и ландшафтоведения Е.С. Сергеев, С.А. Мавлитов, А.А. Ерофеев, И.П. Котлов, Ю.Н. Бондарь, Б.Н. Шевченко, З.В. Сысуева, за что автор приносит им благодарность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акбари Х., Бондарь Ю.Н., Сысуев В.В. Индикаторные свойства древостоя в ландшафтах краевой зоны валдайского оледенения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2006. № 6. С. 59—66.
2. Арманд Н.А., Крапивин В.Ф., Мкртчян Ф.А. Методы обработки данных радиофизического исследования окружающей среды. М.: Наука, 1987. 270 с.
3. Бердников В.В. Палеокриогенный микрорельеф центра Русской равнины. М.: Наука, 1976. 126 с.
4. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005.
5. Ерёменко Е.А., Панин А.В. Ложбинный мезорельеф Восточно-Европейской равнины. М.: МИРОС, 2010. 192 с.
6. Общегеографическая практика в Подмосковье: Учеб. пособие. М., 2007. 360 с.
7. Подповерхностное зондирование // Отечественная библиография. 1990—2013 гг. URL: <http://www.prometeus.nsc.ru>
8. Сысуев В.В. Моделирование геофизической дифференциации геосистем // Функционирование и современное состояние ландшафтов. М.: Городец, 2004. С. 48—71.
9. Сысуев В.В., Садков С.А., Ерофеев А.А. Бассейновый принцип функционального зонирования: моделиро-

вание структуры и стока водосборных геосистем по априорным данным // Актуальные проблемы ландшафтного планирования: Мат-лы Всеросс. науч.-практ. конф., Москва, 13—15 октября 2011. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. С. 101—105.

10. Таргульян В.О., Целищева Л.К. Трещинная сеть дерново-подзолистых почв и партлюация вещества в профиле: Опыт макро- и мезоморфологического исследования // Микроморфологическая диагностика почв и почвообразовательных процессов. М.: Наука, 1983. С. 33—68.

11. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарёв В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М.: Недра, 1986. 128 с.

12. Экология и продуктивность лесов Нечерноземья (на примере Валдая) / Под ред. М.А. Глазовской. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. 143 с.

13. Bamber J.L., Siegert M.J., Griggs J.A. et al. Paleofluvial Mega-Canyon Beneath the Central Greenland Ice Sheet // Science. 2013. Vol. 341. 997—999 p.

14. Huisman J.A., Hubbard S.S., Redman J.D., Annan A.P. Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Review // Vadose Zone J. 2003. N 2. P. 476—491.

Поступила в редакцию
08.10.2013

V.V. Sysuev

**GEO-RADAR INVESTIGATION
OF THE POLY-SCALE STRUCTURES IN LANDSCAPES
(CASE STUDY OF THE SMOLENSK-MOSCOW HIGHLAND)**

GPR methods were applied to sound the structure of soils and sediments of the Valdai Upland (landscapes of the edge zone of the last glacial period) and the Smolensk-Moscow Upland (secondary moraine landscapes). Application of the OKO ground penetrating radar equipped with multi-frequency antenna heads (operating frequencies of 35—100, 700 and 250 MHz) made it possible to investigate the poly-scale 3D structure of soils and sediments, as well as the hydrogeological structure of the drainage basin of the Loninka River.

Key words: poly-scale structures, landscapes, ground penetrating radar application.